Sonderdruck aus „Bildmessung und Luftbildwesen“ 1958, Heft 3, Seite 71—88



Bestimmung von Gletschergeschwindigkeiten aus Luftbildern

Von Walther Hofmann, München

Herbert Wichmann Verlag GmbH., Berlin-Wilmersdorf, Hildegardstraße 5



Bestimmung von Gletschergeschwindigkeiten aus Luftbildern

Von Walther Hofmann, München

Seit den grundlegenden Arbeiten von S. Finsterwalder, O. v. Gruber, H. Hess, G. Kerschensteiner und anderen hat die Bildmessung in Gestalt der terrestrischen Photogrammetrie auch in der Gletscherforschung entscheidende Bedeutung gewonnen. Ermöglichte sie ursprünglich überhaupt erstmals die genaue und vollständige topographische Aufnahme und Wiedergabe eines so schwer zugänglichen und komplizierten Gebildes wie des Gletschers, so wurde sie bald zum Studium der Veränderungen der Gletscher herangezogen. Seitdem die Gletscher als äußerst empfindliche Indikatoren von Klimaschwankungen erkannt waren, galt es, ihre Veränderungen meßtechnisch zu verfolgen und daraus Rückschlüsse auf ihren Haushalt, auf ihr augenblickliches und zukünftiges Verhalten zu ziehen. Die terrestrische Photogrammetrie lieferte der Glaziologie erstmals Meßergebnisse, die sich nicht nur auf die Zunge oder auf Randgebiete der Gletscher beschränkten, sondern ihre ganze Oberfläche erfaßten. So war es möglich, durch wiederholte Aufnahmen einiger charakteristischer Gletscher in den Alpen ihren Rückzug seit etwa 1890 zahlenmäßig zu verfolgen[1]). Aber auch und gerade für die Erforschung außereuropäischer Gletschergebiete im Rahmen von Expeditionen wurde die Photogrammetrie als die einzig rationelle Meß- und Aufnahmemethode erkannt, so daß heute eine stattliche Reihe von Gletschern aller Erdteile in ihrem Stand zu verschiedenen Zeitpunkten erfaßt sind und ihr Verhalten laufend verfolgt werden kann.

Durch R. Finsterwalder wurde die Messung der Geschwindigkeit der Fließbewegung des Gletschereises mit Hilfe der terrestrischen Photogrammetrie entwickelt und eingeführt[2]). Er benutzte dazu Vergleichsaufnahmen vom Rande des Gletschers aus, die mit einem angemessenen Zeitintervall im selben Aufnahmeort und unter genau gleicher Aufnahmerichtung aufgenommen waren. Die Bewegung des Gletschers — etwa in einem Profil, senkrecht zur Fließrichtung — äußert sich in den Vergleichsbildern durch Bewegungsparallaxen, die in einem Komparator unter stereoskopischer Betrachtung ausgemessen werden können. Die Bewegung selbst ergibt sich durch Kombination mit der Entfernung der Meßpunkte vom Aufnahmeort, die ebenfalls photogrammetrisch aus einer Standlinie bestimmt wird. Praktisch

1) R. Finsterwalder: Die zahlenmäßige Erfassung des Gletscherrückgangs an Ostalpengletschern. — Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie, 1953, S. 189—239.

2) R. Finsterwalder: Geschwindigkeitsmessungen an Gletschern mittels Photogrammetrie. — Zeitschrift für Gletscherkunde 1931, S. 252—263.

läuft dies auf die Bestimmung des Bildmaßstabes in den Meßpunkten hinaus. Diese ebenso elegante wie einfache Methode, die keinerlei weitere Reduktionen erfordert, liefert die Fließbewegung des Gletschers im Meßzeitraum mit einer Genauigkeit von etwa 5 %. Ihr einziger Nachteil ist der Abfall der Genauigkeit proportional zur Entfernung der Meßpunkte vom Aufnahmeort, also zur Gletscherbreite, hervorgerufen durch die Abnahme des Bildmaßstabes. Dem kann durch Doppelaufnahme von beiden Ufern des Gletschers begegnet werden. — Die Methode hat sich in den Alpen und auf Expeditionen vielfach bewährt und grundlegend zur Kenntnis der Gletscherdynamik beigetragen.

Möglichkeiten der luftphotogrammetrischen Gletschermessung

Es liegt nahe, nach der stürmischen Entwicklung der Luftphotogrammetrie im Lauf der letzten Jahrzehnte auch deren Verwendung für glaziologische Forschungsaufgaben in Betracht zu ziehen. Gegenüber den terrestrischen Methoden ergäben sich dabei zwei wesentliche Vorteile: Einmal ist ein Gletscher in seiner Gesamterstreckung aus der Luft weit einfacher zu überblicken und aufzunehmen als vom Boden, wo die terrestrische Aufnahme fast immer an die Einrichtung mehrerer, oft weit voneinander abliegender Standlinien gebunden ist. Zum anderen stellen angenäherte Senkrechtaufnahmen aus angemessener relativer Flughöhe den gesamten Gletscher in beinahe konstantem Maßstab dar. Der in der terrestrischen Photogrammetrie unvermeidliche Genauigkeitsabfall der Auswertung mit wachsender Auswerteentfernung ist damit ausgeschaltet.

Doch stößt die Übertragung der vorher genannten terrestrischen Verfahren auf die Luftphotogrammetrie zunächst auf Schwierigkeiten verschiedener Art.

Bei der topographischen Aufnahme eines Gletschers aus der Luft können die Elemente der gegenseitigen und absoluten Orientierung nicht alle und nicht mit ausreichender Genauigkeit bestimmt werden. Es ist daher der Aufbau eines Netzes luftsichtbarer Punkte auf dem Eis und im umgebenden Gebirgsgelände notwendig, die als Paßpunkte eine sichere Auswertung in den relativ großen Maßstäben glaziologischer Arbeitskarten garantieren müssen. Daß diese Aufgabe bewältigt werden kann, zeigen die hervorragenden Arbeiten der Schweizer Schule[3]), des französischen IGN[4]) sowie die Aufnahmen und Auswertungen nordamerikanischer Gletscher durch den Geological Survey der USA[3]).

Bei der photogrammetrischen Bestimmung von Fließgeschwindigkeiten aus Vergleichsbildern besteht jedoch die Hauptschwierigkeit darin, daß es praktisch unmöglich ist, in der Luft dieselben Aufnahmeverhältnisse herzustellen wie bei der terrestrischen Photogrammetrie. Vergleichsmeßbilder des Gletschers können — zumindest nach dem heutigen Stand der Aufnahmetechnik — nicht vom genau gleichen Ort und mit derselben räumlichen Stellung der Bildebene aufgenommen werden. Ort, Richtung und Neigung zweier Vergleichsaufnahmen werden vielmehr voneinander differieren. Die Auswertung erfordert daher Maßnahmen, mit denen die meßbaren Bildverschiebungen auf reine Bewegungsparallaxen reduziert werden[5]).

Daß dieses an sich lösbare Problem noch nicht bearbeitet worden ist, hat jedoch wohl noch einen anderen Grund, der in den Studienobjekten selbst, den Talgletschern der Kettengebirge, speziell der Alpen, liegt. Die Fließbewegungen dieser Gletscher sind so langsam, daß ihre Erfaßbarkeit durch luftphotogrammetrische Aufnahmen bisher fraglich erschien. Während die terrestrische Photogrammetrie ihre Aufnahmestandorte dicht an den Gletscher legen und damit sicher meßbare Bewegungsparallaxen gewinnen kann, verbietet das Gebirgsgelände im allgemeinen Luftaufnahmen aus geringer Flughöhe über dem Gletscher. Bei kleinem Bildmaßstab nehmen jedoch die Bewegungsparallaxen Werte an, die an der Grenze der sicheren Meßbarkeit liegen. Diese Schwierigkeit könnte prinzipiell durch eine Verlängerung

[3]) Noch nicht veröffentlicht.

[4]) Siehe Generalbericht der Kommission V der Internationalen Gesellschaft für Photogrammetrie, 8. Internationaler Kongreß Stockholm 1956, S. 8.

[5]) Eine allgemeine Analyse zum Problem der luftphotogrammetrischen Geschwindigkeitsmessung an Gletschern wird durch R. Finsterwalder unter dem Titel "Measurements of ice velocity by air photogrammetry" beim Symposion über Gletscher-Dynamik der Commission on Snow and Ice in Chamonix, 16.—24. September 1958, vorgelegt.

des Zeitintervalls zwischen den Vergleichsaufnahmen umgangen werden. Doch bedeutet längere Zeit verstärkte Ablation und Veränderung auf den Gletscherzungen, jenen Teilen, deren Fließgeschwindigkeit hauptsächlich von Interesse ist[6]). Eine sichere Identifizierung von Vergleichspunkten wird dann auch unter Ausnutzung stereoskopischer Betrachtung unmöglich.

Mit den Mitteln der modernen Photogrammetrie, vor allem bei Verwendung der praktisch verzeichnungsfreien Hochleistungsobjektive mit ihrem großen Auflösungsvermögen, kann jedoch die Gletscherbewegung auch in kurzen Zeiträumen erfaßt werden, wie folgende Abschätzung zeigt:

Als Mindestparallaxe, die noch eine sichere Bestimmung der Gletscherbewegung ermöglicht, kann der Betrag von etwa 0,1 mm angenommen werden. Als runder Mittelwert der Geschwindigkeit von Alpengletschern sei der Wert 100 m pro Jahr oder 250 mm pro Tag gewählt. Hieraus ergibt sich ein Mindest-Bildmaßstab einer nach 1 Tag wiederholten luftphotogrammetrischen Aufnahme von

$$M_o^{min} = \frac{0,1}{250} = 1:2500.$$

Dieser Maßstab kann sich bei einer Wiederholung nach d Tagen auf

$$M_d^{min} = 1:(2500\,d)$$

verringern. Setzt man als günstigstes Zeitintervall für die Wiederholungsaufnahme $d = 5$ Tage an, so ergibt sich als Mindest-Bildmaßstab

$$M^{min} = 1:12\,500.$$

Die maximale Flughöhe H^{max} über dem Gletscher, die diesem Maßstab entspricht, beträgt

bei Normalwinkelkammern $f = 21$ cm: $H^{max} \approx 2600$ m

bei Weitwinkelkammern $f = 15$ cm: $H^{max} \approx 1900$ m.

Sie kann in beiden Fällen auch im extremen Hochgebirge bei Querüberfliegung des Gletschers sicher eingehalten, meist sogar beträchtlich unterschritten werden, so daß die Bewegungsparallaxen noch größere Werte annehmen und entsprechend zuverlässiger eingemessen werden können.

Da es in jedem Fall zweckmäßig sein wird, ein Querprofil des Gletschers ganz auf einer Aufnahme abzubilden, soll noch abgeschätzt werden, welche Horizontalentfernungen s^{max} ein Luftbild bei maximaler Flughöhe überspannt. Die Werte sind:

bei $f = 21$ cm, Bildformat 18×18 cm: $s^{max} = 2,25$ km

bei $f = 15$ cm, Bildformat 23×23 cm: $s^{max} = 2,88$ km.

Diese Bilddeckungen reichen zur Überbrückung aller Alpengletscher mit einem Bild aus und erfordern nur bei wenigen außerarktischen Gletschern, wie etwa dem Fedtschenko-Gletscher im Pamir, zwei Meßbilder für ein Querprofil.

Da es sich im Laufe der folgenden Überlegungen als günstig erweisen wird, wenn das Querprofil eines Gletschers nicht nur auf einem Bild, sondern auf zwei Folgebildern eines Bildfluges, die zu einem Modell vereinigt werden können, ganz enthalten ist, seien noch die maximalen Gletscherbreiten g^{max} für den oben vorausgesetzten Fall bei 60 % Überdeckung der Folgebilder angegeben. Sie betragen bei Verwendung von

Normalwinkelkammern: $g^{max} = 1,35$ km

Weitwinkelkammern: $g^{max} = 1,73$ km.

Die genannte Bedingung ist also bei der Mehrzahl der Alpengletscher einzuhalten. Bei breiteren Gletschern muß die Überdeckung größer gewählt werden, wie sich prinzipiell auf Grund weiterer Überlegungen ein Bildflug mit 90 % Überdeckung empfiehlt.

---

[6]) An eine photogrammetrische Geschwindigkeitsmessung im Firnfeld kann wegen der Geringfügigkeit der dort herrschenden Bewegungen vorläufig wohl nicht gedacht werden.

Diese Abschätzungen werden jedoch bedeutungslos, wenn es sich um luftphotogrammetrische Geschwindigkeitsmessungen an arktischen und antarktischen Gletschern, etwa an den Eisströmen Grönlands, handelt. Da die Fließgeschwindigkeiten dieser Gletscher 16—80mal größer sind als diejenigen der Alpengletscher (4—20 m pro Tag), werden ausreichende Bewegungsparallaxen in jedem praktisch möglichen Bildmaßstab erhalten. Die Flugplanung kann dort ausschließlich auf die Bedingungen der Überdeckung eines Gletscherprofiles mit einem Bild bzw. mit einem Modell abgestellt werden. Hierbei ist allerdings zu bedenken, daß etwa Grönlands Eisströme Breiten bis zu 8 km aufweisen, daß also die genannten Bedingungen oft nur aus sehr großen Flughöhen eingehalten werden können.

Auswertung der Meßbilder

1. Auswertung und Vergleich unabhängiger Modelle.

Da mit Luftbildern der einfache Bildvergleich terrestrischer Geschwindigkeitsaufnahmen nicht möglich ist, kann zunächst daran gedacht werden, die Bewegung von Punkten der Gletscheroberfläche aus dem Unterschied ihrer Koordinaten, die durch zwei unabhängige Auswertungen der Bildflüge mit Einzelmodellen oder durch Aerotriangulation gewonnen wurden, zu bestimmen. Ein solches Vorgehen ist immer möglich, wenn die beiden Bildflüge annähernd denselben Ausschnitt des Gletschers unter Einschluß unbewegter randlicher Geländepunkte überdecken und stereoskopisch auswertbar sind. Für die Auswertung werden nicht einmal Paßpunkte im engeren Sinn benötigt; es genügt vielmehr die Kenntnis einer „Paßstrecke", also einer in einem Modell enthaltenen Distanz zwischen zwei festen Punkten, aus der der Modell- bzw. Auswertemaßstab zu bestimmen ist. Diese Tatsache ist für die Geschwindigkeitsmessung an Gletschern in schwer zugänglichen Gebieten von großer Bedeutung. Da nur die relativen Verschiebungen der Gletscherpunkte benötigt werden, brauchen die Modelle nicht nach Lage und Höhe orientiert zu werden.

Die Bilder des ersten Aufnahmefluges werden paarweise mit Folgebildanschluß aneinandergefügt und der Maßstab aus der in einem der entstehenden Modelle enthaltenen Paßstrecke bestimmt. Die Auswertung kann sich auf die Punkte bzw. Profile des Gletschers sowie auf einige Punkte im festen Randgelände zu beiden Seiten beschränken.

Die Modelle des Wiederholungsbildfluges werden mit Hilfe der koordinierten oder kartierten randlichen Geländepunkte auf die Auswertung des ersten Fluges eingepaßt. Aus dem Lagevergleich derselben Gletscherpunkte bzw. -profile folgen unmittelbar deren Verlagerungen im Meßzeitraum nach absoluter Größe und nach beliebig bezogener Richtung.

Sind außer einer Paßstrecke noch in einem Modell Paßpunkte (mindestens zwei nach Lage und Höhe und einer nach Höhe) bekannt oder eingemessen, so lassen sich durch die Auswertungen die Aufnahmeorte und -richtungen beider Bildflüge bestimmen. Diese Werte können eventuell für weitere Korrekturen des unter 2. beschriebenen, direkten Verfahrens zur Geschwindigkeitsmessung verwendet werden.

Dem eben geschilderten Verfahren haften jedoch einige Mängel an, die seine Verwendung als unzweckmäßig erscheinen lassen.

Als erster und gewichtigster Einwand ist auf die Tatsache hinzuweisen, daß dabei kleine Verschiebungen von Modellpunkten aus zwei unabhängigen Auswertungen bestimmt werden. Dieses Vorgehen widerspricht dem meßtechnischen Grundsatz, kleine Unterschiede zwischen großen Werten nicht als Differenz dieser Werte zu berechnen, sondern unmittelbar zu messen. Die photogrammetrischen Auswertungen stellen — so betrachtet — Punktmengen dar, deren innere Beziehung zwar mit hoher Nachbargenauigkeit wiedergegeben ist, deren Gesamtlage aber durch nicht unbeträchtliche systematische Fehler verfälscht sein kann. Beim Lagevergleich der beiden Punktmengen können und werden die unabhängigen und daher verschiedenen systematischen Fehler sich additiv auf das Ergebnis — hier die Lageveränderung — auswirken und es um Beträge bis zu seiner eigenen Größenordnung verfälschen.

Als weitere Nachteile seien nur stichwortartig genannt: Schwierigkeiten und Fehlerquellen bei der Punktauswahl und -identifizierung in getrennten Auswertungen; langwieriger, von der eigentlichen Aufgabe abliegender Arbeitsvorgang; Abhängigkeit von Aufnahme- und Auswertegeräten hoher Präzision, da die Einzelauswertungen große Genauigkeit besitzen müssen (siehe erster Einwand!), und ähnliches.

Im folgenden soll daher ein Verfahren beschrieben werden, das die eben aufgeführten Mängel nach Möglichkeit vermeidet und — wie bei der terrestrischen Photogrammetrie — zur Geschwindigkeitsbestimmung unmittelbar zwei Vergleichsaufnahmen verschiedener Bildflüge heranzieht.

2. Unmittelbare Messung und Reduktion von Bildverschiebungen aus Vergleichsaufnahmen.

Als Ausgangsmaterial werden wiederum zwei Bildflüge vorausgesetzt, die mit einem zeitlichen Abstand von wenigen Tagen denselben charakteristischen Ausschnitt eines Gletschers durch Bildstreifen erfaßt haben, deren Achse annähernd senkrecht zur Fließrichtung des Eises gerichtet ist. Die Flughöhen und damit die Bildmaßstäbe sollen in beiden Flügen mit größtmöglicher Annäherung gleich sein. Hingegen genügt für die Lage der Aufnahmeorte und für die Richtung ihrer Verbindungslinie eine ungefähre Annäherung. Um auf jeden Fall die Bilder des ersten Fluges mit denen des Wiederholungsfluges paarweise zu stereoskopischen Modellen vereinigen zu können, sind Aufnahmen mit 90% Überdeckung vorzusehen.

Die Auswertung geht von einer Bezugsgeraden zwischen zwei festen Punkten A am linken (unteren) und E am rechten (oberen) Gletscherrand aus (siehe hierzu und zum folgenden Abb. 1). Beide Punkte müssen auf zwei einander annähernd entsprechenden Bildern der beiden Aufnahmeflüge klar identifizierbar und gut einstellbar sein. Sie werden so ausgewählt, daß die Vertikalebene durch ihre Verbindungsgerade die Gletscheroberfläche in einem Profil schneidet, das mit großer Annäherung senkrecht zur vermutbaren Fließrichtung des Eises verläuft. Würde die Gerade AE auf der Gletscheroberfläche selbst liegen und wären die beiden Vergleichsbilder strenge Senkrechtaufnahmen, so ergäbe eine Messung der Bildverschiebungen von Punkten der Gletscheroberfläche senkrecht zum Profil AE unmittelbar die Bewegungen im Bildmaßstab. Da beide Bedingungen nur angenähert erfüllt sind, stellen die gemessenen Bildverschiebungen Kombinationen aus der Gletscherbewegung und aus den Einflüssen der Höhenunterschiede im Modell und der Neigungsdifferenz der beiden Bilder dar. Sie müssen auf reine Bewegungsparallaxen reduziert werden.

Dabei kann die Reduktion wegen Neigungsdifferenz bei gut angenäherten Senkrechtaufnahmen vernachlässigt werden, wie folgende Betrachtung zeigt:

Eine Verkantungsdifferenz der beiden Aufnahmen wirkt sich auf die gemessenen Bildverschiebungen nicht aus, wenn die Geraden AE im linken und im rechten Bild streng parallel gerichtet werden.

Zerlegt man die Neigungsdifferenz der beiden Aufnahmeachsen in zwei Komponenten, deren eine parallel zum Profil AE, die andere senkrecht dazu verläuft, so erkennt man, daß beide nur Einflüsse vom Betrag kleiner Größen 2. Ordnung auf die gemessenen Bildverschiebungen ausüben. Der Einfluß der ersten Komponente wächst dabei mit dem Abstand der Profilpunkte vom Bildhauptpunkt, der Einfluß der zweiten Komponente ist proportional der Bildverschiebung. Beide Einflüsse sind bei kleinen Neigungsdifferenzen vernachlässigbar gegenüber anderen Fehlern wie Maßstabsdifferenzen usw. Eine ähnliche Vernachlässigung wird auch bei der Messung von Bewegungsparallaxen aus terrestrischen Aufnahmen stillschweigend vorgenommen, wenn eine kleine Differenz zwischen den Aufnahmerichtungen der Vergleichsbilder vorliegt. An die Stelle der dort üblichen Einpassung auf den Bildhintergrund tritt hier die Einpassung auf die Gerade AE.

Die Reduktion wegen der Höhenunterschiede zwischen dem Profil auf der Gletscheroberfläche und der Geraden AE wird im Anschluß an die Messung der Bilderverschiebungen behandelt, für die sich nunmehr folgender Gang ergibt:

1.) Es sei zunächst der Fall angenommen, daß der Gletscher in seiner ganzen Breite auf je einer Aufnahme der beiden Bildflüge abgebildet ist.

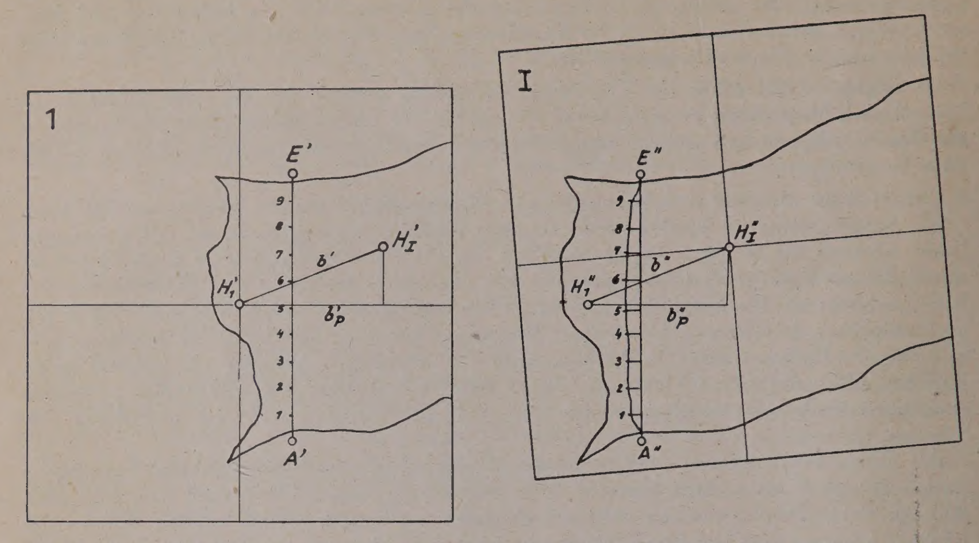


Abb. 1. Schema der Bildverschiebungsmessung im Querprofil eines Gletschers. Linkes Bild: 1. Flug, rechtes Bild: Wiederholungsflug. Die dargestellten Verhältnisse entsprechen etwa einem grönländischen Gletscher.

Nach Auswahl geeigneter Bilder, Kennzeichnung und stereoskopischer Übertragung ihrer Hauptpunkte wird die sich als „linkes" Bild erweisende Aufnahme in den linken Träger eines stereoskopischen Auswertegerätes so eingelegt, daß die Gerade E parallel zur y-Bewegung des Gerätes verläuft. Das rechte Bild wird beim Einlegen ebenfalls mit der Geraden AE parallel zur y-Richtung ausgerichtet. Die beiden Bilder können dann stereoskopisch betrachtet werden. Der räumliche Eindruck hängt vor allem von der Basis b_p ab, die sich bei der Aufnahme der beiden Bildflüge zufällig oder gewollt ergeben hat. Er wird dadurch, daß die Bilder nicht streng nach Kernstrahlen orientiert sind, etwas beeinträchtigt. Dem räumlichen Geländeeffekt überlagert sich auf dem Gletscher ein zusätzlicher Raumeffekt, hervorgerufen durch die Bewegungsparallaxen.

Die Ausmessung erfolgt mit der b_x-Bewegung des Gerätes, wobei sich x-Parallaxen P ergeben. y-Parallaxen, verursacht durch kleine Maßstabs- und Neigungsdifferenzen, werden weggestellt.

Die b_x-Ablesungen in den Punkten A und E seien streng gleich groß:

$$P_A = P_E = P_0 \, .$$

Nach stereoskopischer Auswahl charakteristischer Punkte, die zweckmäßig auf beiden Bildern gekennzeichnet werden, in genügender Zahl über das Profil verteilt, wird deren Verschiebung P_i aus den abgelesenen Werten P_i' nach

$$P_i = P_i' - P_o \qquad i = 1 \ldots (1) \ldots n$$

gebildet. Zugleich mit der Messung werden die Profilpunkte aus dem linken Bild kartiert; der Kartierung werden die Profildistanzen s_i vom Punkte A in mm entnommen. Damit ist die Ausmessung der Vergleichsbilder beendet.

Die Messungen zur Reduktion der P_i auf reine Bewegungsparallaxen schließen sich unmittelbar an. Es gilt dabei, den Einfluß der Höhenunterschiede der Gletscherpunkte gegen die Gerade AE auf die Werte P_i zu bestimmen. Die Höhendifferenzen Δh können in einem

Modell aus zwei Folgebildern einunddesselben Fluges gewonnen werden, das sich ebenfalls über die ganze Gletscherbreite erstreckt. Die Δh wirken sich darin als Parallaxenunterschiede Δp aus. Zweckmäßig wählt man ein Modell, dessen eines Bild schon zur Messung der P_i benutzt wurde und daher die eingemessenen Profilpunkte markiert enthält.

Da die Höhenunterschiede zur Reduktion wieder als Parallaxenunterschiede gebraucht werden, ist eine Rechnung mit tatsächlichen Höhen unnötig. Zwischen den Höhenunterschieden Δh und den Parallaxenunterschieden Δp wird vielmehr unter Vernachlässigung der Glieder höherer Ordnung direkte Proportionalität angenommen. Diese Vereinfachung ist bei flachen Gletschern und großer relativer Flughöhe stets zulässig.

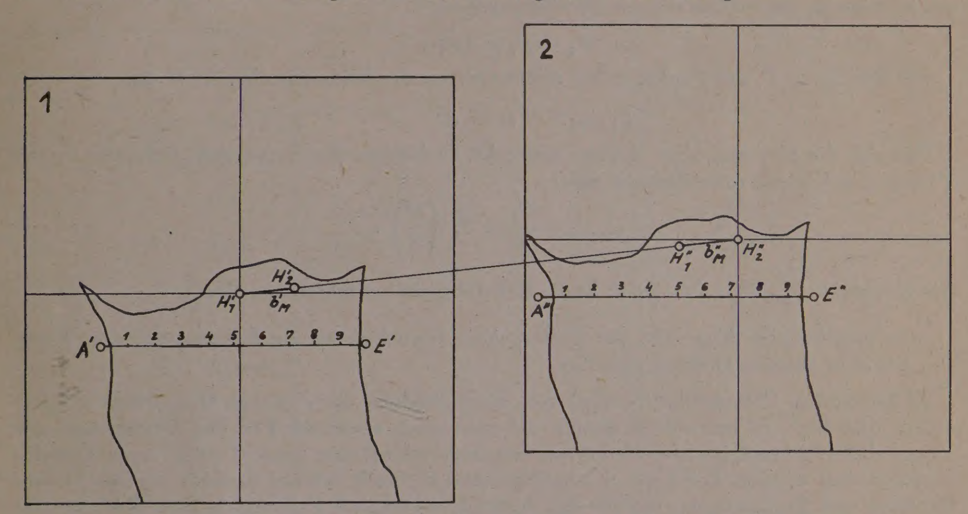


Abb. 2. Schema der Parallaxenmessung für das Querprofil aus Abb. 1. Zwei Folgebilder desselben Fluges.

Die Bilder können diesmal nach Kernstrahlen orientiert eingelegt werden (siehe hierzu und zum folgenden Abb. 2). Unter Wegstellen der restlichen y-Parallaxen erfolgt die Messung der x-Parallaxen $p_A \,..\, p_i \,..\, p_E$ in den Punkten des Profiles. Zwischen den Punkten A und E wird sich dabei im allgemeinen ein Parallaxenunterschied

$$\Delta p_A^E = p_E - p_A$$

ergeben, der teilweise vom tatsächlichen Höhenunterschied der beiden Punkte, teilweise von der unbekannten Schräglage des Modells herrührt. Δp_A^E wird durch Rechnung proportional zur Entfernung s_i auf die Parallaxen p_i verteilt, was zu Korrekturen

$$\Delta \bar{p}_i = \Delta p_A^E \cdot \frac{s_i}{s_E}$$

führt. Durch die Reduktion

$$\bar{p}_i = p_i - \Delta \bar{p}_i$$

entstehen die Parallaxen $\bar{p}_i$ eines gedrehten Modells, in dem die Punkte A und E auf gleicher Höhe liegen, die Gerade AE also horizontal verläuft[7]). Hieraus werden nach

$$d\bar{p}_i = \bar{p}_i - p_A = \bar{p}_i - \bar{p}_E$$

die Parallaxenunterschiede $d\bar{p}_i$ der Profilpunkte gegenüber der Geraden AE gewonnen.

Die Werte $d\bar{p}_i$ gehören zu einem Modell von der Basis b_M, deren Länge in mm aus den beiden Bildern als Distanz der Hauptpunkte entnommen werden kann. Beim Übergang

---

[7]) Der Winkel, um den AE gedreht werden muß, ist dabei stets sehr klein, weshalb die vereinfachte Transformation mit den $\Delta \bar{p}_i$ stets angängig ist.

auf das Modell der beiden Vergleichsbilder ist dessen andere Basis b_P zu berücksichtigen. Sie kann als die senkrecht zum Profil AE wirksame Komponente des Hauptpunktabstandes b (in mm) in den beiden Vergleichsbildern gemessen werden (siehe Fig. 1). Stark angenähert gleiche Flughöhen vorausgesetzt, ergeben sich somit die durch Höhenunterschiede hervorgerufenen Parallaxenunterschiede dP_i im Vergleichsmodell zu

$$dP_i = d\bar{p}_i \cdot \frac{b_P}{b_M} .$$

Sie stellen die Reduktionen dar, um die die Bildverschiebungen P_i verbessert werden müssen, um in reine Bewegungsparallaxen $\overrightarrow{P_i}$ überzugehen:

$$\overrightarrow{P_i} = P_i - dP_i .$$

Die Bewegung B_i der Punkte selbst ergibt sich aus der Bildmaßstabszahl M zu

$$B_{i\,(mm)} = \overrightarrow{P_i} \cdot M .$$

Hat sich die Messung über d Tage erstreckt, so beträgt die Tagesgeschwindigkeit G_i der Punkte der Gletscheroberfläche in mm:

$$G_i = \frac{B_i}{d} = \overrightarrow{P_i} \cdot \left(\frac{M}{d}\right) .$$

Die Konstante $\frac{M}{d}$ kann dabei als „Tages-Maßstabszahl" aufgefaßt werden.

Eine unabhängige Kontrolle der Endergebnisse wird durch die Bestimmung der Werte dP_i aus dem zweiten Bildflug geliefert.

2.) Bei großer Gletscherbreite kann sich die Aufnahme eines ganzen Querprofils mit nur einem Bild bzw. in nur einem Modell als unmöglich erweisen. Für die Ausmessung der Vergleichsbilder und für die Reduktionsbestimmung müssen dann 2 oder mehr Modelle herangezogen werden. Die unter 1.) beschriebene Methode erfährt dadurch gewisse Modifikationen und Ergänzungen, die für den leicht fortsetzbaren Fall von je zwei Modellen im folgenden kurz behandelt werden.

Die beiden Profilendpunkte A und E liegen diesmal auf zwei Folgebildern, so daß ihren x-Werten nicht schon durch Ausrichtung des rechten Bildes im ersten Modell gleiche Größe erteilt werden kann (siehe Abb. 3). Die Gerade AE erhält vielmehr in den rechten Bildern eine gewisse Schräglage bezüglich der y-Richtung, die jedoch empirisch bei Berücksichtigung der voraussichtlichen Bildverschiebungen klein gehalten werden kann.

Die Messung ergibt zunächst im ersten Vergleichsbildpaar Verschiebungswerte P_i'', die nach

$$P_i' = P_i'' - P_o$$

auf den x-Wert $P_o = P_A$ des Punktes A bezogen werden.

Beim Übergang vom ersten zum zweiten Vergleichsmodell muß die Schräglage der Profillinie im rechten Bild gegenüber der Profilrichtung im linken Bild, die gleich der y-Richtung ist, erhalten bleiben. Sie wird durch 2 Punkte I und II übertragen, die am unteren und oberen Rand des von den Folgebildern doppelt überdeckten Gesichtsfeldes liegen. Das rechte Bild des zweiten Vergleichsmodells wird so eingelegt, daß die Verschiebungen P_I' und P_{II}' gleich den im ersten Modell gemessenen Werten sind.

Nach Fortsetzung der Messung im zweiten Modell ergibt sich im Punkte E ein von Null verschiedener Verschiebungswert P_E':

$$P_E' = P_E'' - P_o \neq 0 .$$

Analog zur Vertikaldrehung bei der Höhenreduktion unter 1.) wird nun rechnerisch eine Horizontaldrehung um Punkt A ausgeführt, die den Wert P_E' zum Verschwinden bringt,

d. h. den Profilen in den rechten und linken Bildern der Bilder dieselbe Richtung gegenüber dem Gerät erteilt. Sie liefert nach

$$\Delta P_i = P_E' \cdot \frac{s_i}{s_E}$$

Reduktionsgrößen ΔP_i, mit denen die Werte P_i' nach

$$P_i = P_i' - \Delta P_i$$

in Bildverschiebungen P_i wie unter 1.) verwandelt werden können.

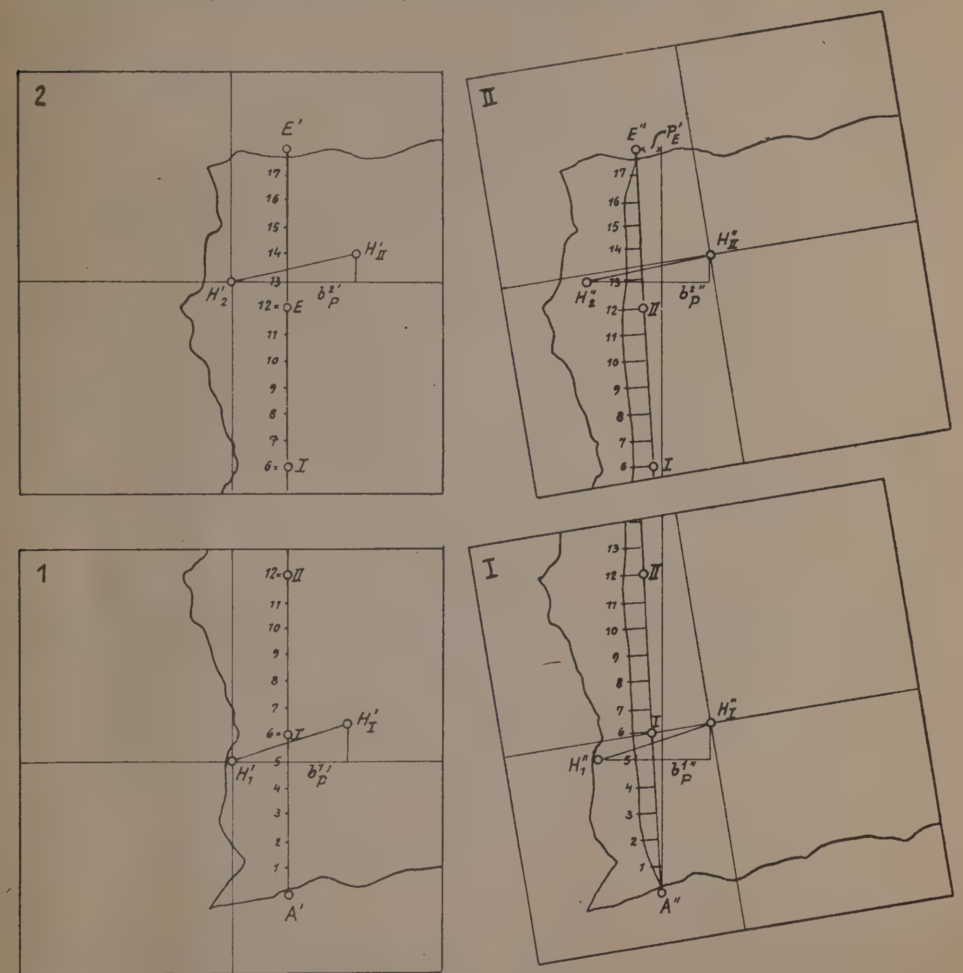


Abb. 3. Schema der Bildverschiebungsmessung in einem Querprofil, das sich über zwei Folgebilder erstreckt. Linke Bilder: 1. Flug, rechte Bilder: Wiederholungsflug.

Ähnlich ist beim 2. Teil der Auswertung, der Bestimmung der Höhenreduktion, zu verfahren. In einem ersten Modell werden zunächst die Parallaxenunterschiede gegenüber einer willkürlichen, durch A laufenden Gerade bestimmt. Diese Gerade muß mit mindestens 2 Anschlußpunkten ins zweite Modell übertragen und verlängert werden. Der Endpunkt E

des Profiles wird gegenüber dieser Geraden einen Parallaxenunterschied aufweisen, der durch Drehung der Geraden samt den Profilpunkten wegreduziert wird. So ergeben sich schließlich wieder die benötigten Parallaxenunterschiede gegenüber der Geraden AE.

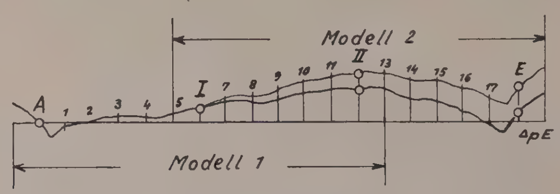


Abb. 4. Messung und Reduktion der Höhenkorrektur in zwei Folgemodellen. Aufrißdarstellung der Höhen- bzw. Parallaxenverhältnisse.

Arbeitstechnisch ergibt sich hierfür folgender Gang:

Die x-Parallaxen p_i werden in beiden Folgemodellen unabhängig wie unter 1.) gemessen. Als Bezugsgerade wählt man zweckmäßig die Gerade $p_x = p_A =$ const., also die „Horizontale" durch A im ersten Modell. Dann ergeben sich die Parallaxenunterschiede Δp_i gegenüber der Bezugsgeraden für die Profilpunkte des ersten Modells zu

$$\Delta p_i = p_i - p_A \;.$$

Unter ihnen werden Δp_I und Δp_{II}, die zu den in beiden Modellen enthaltenen Punkten I und II gehören, zur Übertragung ausgewählt.

Bei der Behandlung der im zweiten Modell gemessenen Parallaxen p_i''' ist zunächst zu berücksichtigen, daß die Basen $\overset{1}{b}_M$ und $\overset{2}{b}_M$ der beiden Modelle im allgemeinen um kleine Beträge voneinander verschieden sein werden. Es ist daher eine Reduktion $\Delta p_i''$ der gemessenen Parallaxen, oder einfacher der Parallaxenunterschiede gegenüber Punkt I im zweiten Modell auf die Basis $\overset{1}{b}_M$ notwendig:

$$\Delta p_i''' = p_i''' - p_I'''$$

$$\Delta p_i'' = p_i''' \cdot (\overset{1}{b}_M : \overset{2}{b}_M) \;.$$

Nunmehr werden die Größen $\Delta p_I''$ und $\Delta p_{II}''$ auf die entsprechenden Größen Δp_I und Δp_{II} des ersten Modells rechnerisch abgestimmt. Hierzu dient zunächst eine Parallaxenverschiebung, durch die die Punkte I im ersten und zweiten Modell zur Deckung gebracht werden. Sie liefert die neuen Parallaxenunterschiede $\Delta p_i'$ nach

$$\Delta p_i' = \Delta p_i'' + \Delta p_I \;.$$

Ihr folgt eine stets kleine Drehung $\Delta \bar{p}_i'$ um I, die auch die Punkte II zusammenfallen läßt:

$$\Delta \bar{p}_i' = (\Delta p_{II} - \Delta p_{II}') \cdot \frac{s_i - s_I}{s_{II} - s_I} \;.$$

Damit ergeben sich die Parallaxenunterschiede Δp_i im zweiten Modell relativ zur Bezugsgeraden durch A nach

$$\Delta p_i = \Delta p_i' + \Delta \bar{p}_i' \;.$$

Der Profilendpunkt E erhält dabei einen Parallaxenunterschied Δp_E, der durch eine letzte Drehung wegreduziert werden muß. Die Drehung liefert Korrekturen $\Delta \bar{p}_i$, mit denen sich die auf die Gerade AE bezogenen Parallaxenunterschiede $d\bar{p}_i$ nach den Formeln

$$\Delta \bar{p}_i = \Delta p_E \cdot \frac{s_i}{s_E}$$

$$d\bar{p}_i = \Delta p_i - \Delta \bar{p}_i$$

ergeben. Sie werden wie unter 1.) weiter behandelt, wobei jedoch die Überführung auf die Basis b_P für die beiden Vergleichsmodelle mit den Basen $\overset{1}{b}_P$ und $\overset{2}{b}_P$ getrennt auszuführen ist.

Liegen zwischen den beiden Übertragungspunkten I und II weitere Profilpunkte i, so sollen sich für sie aus den beiden zur Höhenkorrektur benutzten Modellen gleiche Werte $d\bar{p}_i$ ergeben. Die auftretenden Differenzen geben Einblick in die Zuverlässigkeit der Auswertung.

Da es sich bei der Verlängerung der Bezugsgeraden mit Hilfe der beiden Punkte I und II um eine Extrapolation handelt, muß auf eine ausreichende Überdeckung der zur Profilmessung herangezogenen Bilder geachtet werden. Es liegen daher wohl immer einige Profilpunkte zwischen den Übertragungspunkten, die für die obengenannte Kontrolle zur Verfügung stehen.

Ähnliches gilt für die Höhenübertragung von Modell zu Modell desselben Bildfluges. Auch hier kann die Extrapolation nur bei ausreichender Überdeckung der Modelle auf zuverlässige Werte führen. So wird oft der Fall eintreten, daß für die Profilmessung ein oder zwei Vergleichsmodelle ausreichen, während die Höhenkorrektur aus zwei und mehr Modellen ermittelt werden muß. Nur ein Bildflug mit 90 % Überdeckung bietet die hierfür nötige Auswahl.

Wie unter 1.) besteht auch bei 2.) die Möglichkeit einer unabhängigen Kontrolle durch Ermittlung der Höhenkorrektion aus dem zweiten Bildflug.

Instrumentelle Fragen

Da die Zuverlässigkeit der Ergebnisse entscheidend von der Qualität des Bildmaterials abhängt, kommen für die Bildflüge nur neuzeitliche Aufnahmekammern mit verzeichnungsfreien Hochleistungsobjektiven in Betracht. Die Objektive sollen minimalen Lichtabfall gegen den Bildrand besitzen, da die Natur des aufgenommenen Objektes ohnehin einen scharfen, aufnahmetechnisch nicht leicht zu bewältigenden Gegensatz zwischen den hellen Gletschern in der Bildmitte und den dunklen Uferpartien an den Bildrändern mit sich bringt.

Stehen keine Paßpunkte oder Paßstrecken zur Verfügung, so muß zumindest der Bildmaßstab mit größtmöglicher Schärfe bestimmbar sein. Bei Bildflügen über unzugänglichen Gletschergebieten muß daher der Höhennavigation ein Statoskop oder ein Radar-Altimeter zur Verfügung stehen.

Aus der Darstellung der Methode zur direkten Messung und Reduktion von Bildverschiebungen geht hervor, daß sie mit relativ einfachen Instrumenten ausgeführt werden kann. Es wäre zwar möglich, aber höchst unrationell und unpraktisch, für das beschriebene Verfahren Auswertegeräte 1. und 2. Ordnung zu verwenden. Ein Stereokomparator oder noch besser ein Stereometer mit Zeichenvorrichtung, wie es etwa im Stereopret der Firma Zeiss-Aerotopograph als modernes und zuverlässiges Instrument vorliegt, ist das der Methode angemessene Auswertegerät. Dieselben Dienste leistet selbstverständlich das Stereotop von Zeiss-Aerotopograph, wenn auch seine Rechengetriebe zur Auswertung nicht benötigt werden. Praktische Versuche haben gerade die vorzügliche Eignung der letztgenannten Instrumente erwiesen. Die Größe des Gesichtsfeldes bei aufgesetzten Betrachtungslupen gibt ständig den nötigen Überblick. Die Bilder sind für die laufenden Punktmarkierungen während der Messung zugänglich und können von Hand schnell und in beliebigen Lagen zueinander orientiert werden. Für Einzeichnungen aller Art bedeutet die Verwendung von Papierabzügen einen großen Vorteil, ihre eventuelle Schrumpfung ist für eine Auswertemethode, die nur differentielle Meßwerte benutzt, belanglos. Der mit dem Bildwagen verbundene Zeichenarm bzw. Pantograph ist ein unentbehrliches Hilfsmittel zur Herstellung von Umriß- und Punktkartierungen während der Messung selbst.

Für die zur Reduktion der Bildverschiebungen notwendigen Rechnungen genügt der Rechenschieber.

Mit diesen Hilfsmitteln läßt sich nach bisherigen Erfahrungen ein Gletscherprofil mit 10—15 Punkten in etwa 2 Stunden bearbeiten, wenn es in einem Vergleichsmodell und

einem Höhenmodell (Methode 2. 1.)) ganz enthalten ist. Bei jeweils zwei Modellen für ein Profil (Methode 2. 2.)) wächst die Arbeitszeit auf etwa das Doppelte.

Auf Genauigkeitsfragen soll im Rahmen dieser Arbeit noch nicht näher eingegangen werden. Neben fehlertheoretischen Untersuchungen sind Fehlerberechnungen aus den mehrfach vorhandenen Kontrollen möglich. Vor allem ist die erzielbare Genauigkeit von der Qualität der Aufnahmen abhängig. Es kann angenommen werden, daß aus guten Bildern die Fließgeschwindigkeit von Gletschern mit einer Genauigkeit von 5—10 % bestimmbar ist, ein Wert, der für glaziologische Zwecke vollkommen ausreicht.

Anwendungsbeispiele: Die Fließgeschwindigkeiten grönländischer Gletscher

Eine erste Anwendung der beschriebenen Methode ergab sich im Rahmen der Erkundungen und Vorbereitungen zur Internationalen Glaziologischen Grönland-Expedition (EGIG) 1957—1960. Im Juli 1957 wurde unter der Leitung von P.-E. Victor, dem Direktor der Expéditions Polaires Françaises in Paris, ein Erkundungsflug nach Westgrönland unternommen, bei dem auf Anregung von Prof. Dr. R. Finsterwalder, dem derzeitigen Präsidenten des Direktionskomitees, und von Prof. A. Bauer, Straßburg, dem Generalsekretär der EGIG, eine Luftbildkammer mitgeführt und unter anderem zur Aufnahme einiger Gletscher der Disko- und Umanak-Bucht verwendet wurde. Diese Aufnahmen waren zum Teil von vornherein für den Versuch gedacht, die Fließgeschwindigkeit der Gletscher zu bestimmen. Der Verfasser, der das Glück hatte, neben Professor Finsterwalder als zweiter deutscher Teilnehmer dem Erkundungsunternehmen anzugehören, war selbst an der Planung und Durchführung dieser Bildflüge beteiligt.

Leider konnte in der kurzen verfügbaren Zeit zur Vorbereitung keine neuzeitliche Präzisions-Luftbildkammer mehr besorgt werden. Es stand vielmehr nur eine weitgehend veraltete Kammer von der Bildweite f = 30 cm und dem Bildformat 23 × 23 cm zur Verfügung. Ihr Objektiv lieferte Aufnahmen von unbekannter, aber nicht unbeträchtlicher Verzeichnung und mit starkem randlichem Licht- und Schärfeabfall. Das Flugzeug des Erkundungsunternehmens, eine Transportmaschine vom Typ Nord 2501 der französischen Luftwaffe, war zudem keineswegs als Bildflugzeug eingerichtet. Die Kammer mußte an einem Rohrrahmen aus dem offenen Heck der Maschine frei in die Luft gehängt werden, was sie besonders starken Vibrationen aussetzte und daneben ihre Bedienung sehr erschwerte. Für den Dauerbildflug war die Steighöhe der Maschine mit 5000 m begrenzt, so daß der minimal erreichbare Bildmaßstab rund 1 : 16 700 betrug.

Trotz dieser extrem ungünstigen Aufnahmeverhältnisse wurde ein Bildmaterial gewonnen, das für Erkundungszwecke voll genügt und auch meßtechnisch relativ brauchbar ist. Dies ist vor allem der hohen Flugkunst des Chefpiloten der Maschine, Capitaine Delabruyère, der die schwierigen Bildflüge ohne alle besonderen Navigationsmittel mit erstaunlicher Sicherheit steuerte, und der gewandten Aufnahmetechnik von Sergeant Arnaud, dem Photographen des Unternehmens, zu verdanken, der angeseilt am Heckrand der Maschine sitzend die Kammer bediente.

Die Gletscher an der Westküste Grönlands zwischen dem 68. und dem 72. Breitengrad wurden über ihrem Zungengebiet erstmals am 12. Juli 1957 und mit einem Wiederholungsflug am 17. Juli in 5000 m Höhe überflogen und aufgenommen. Mit der versuchsweisen Auswertung des Bildmaterials am Stereotop des Institutes für Photogrammetrie, Topographie und Allgemeine Kartographie der Technischen Hochschule München wurde im Mai 1958 begonnen.

Bei der Beurteilung der Auswertung ist zu berücksichtigen, daß keinerlei Paßpunkte oder Paßstrecken gegeben waren, daß die Bildweite der Aufnahmekammer nur mit guter Näherung bekannt ist und daß zur Bestimmung der Flughöhen keine besonderen Hilfsmittel wie Statoskop oder Radar-Altimeter zur Verfügung standen. Zwar ist die Auswerte-

methode selbst vollkommen unabhängig von der Bildweite, doch wird zur Umrechnung der Bewegungsparallaxen in Bewegungen der Bildmaßstab gebraucht, der hier nur mit einer Genauigkeit von 3—5 % bekannt ist. Mit derselben Unsicherheit sind daher die Endergebnisse, nämlich die Fließgeschwindigkeiten, von vornherein behaftet. Mißt man der Ausmessung selbst eine etwa gleichgroße Unsicherheit bei, so ergibt sich eine Gesamtgenauigkeit von 6—10 %.

Da sich jedoch die Methode als Ganzes bisher bewährt hat, seien zwei Auswertebeispiele mitgeteilt, die zwar nicht für die Gletscher an Grönlands Westküste, aber für die — je nach den Aufnahmeverhältnissen — möglichen Auswerteverfahren typisch sind.

Das erste behandelt den Kangigdleq-Gletscher (siehe Abb. 5 und Tabelle I), der zu den kleineren Gletschern der Umanak-Bucht gehört und daher unter den gegebenen Voraussetzungen mit einer Meßaufnahme und einem Modell überbrückt werden konnte. In der Tabelle sind die Zahlenwerte für das Profil I, etwa 300 m hinter der Gletscherfront, enthalten. Die Bezeichnungen entsprechen den im 2. Abschnitt unter 1.) aufgeführten Formeln.

Als zweites Beispiel ist der Sigssortartoq-Gletscher gewählt (siehe Abb. 6 und Tabelle II), der als größerer und sehr aktiver Eisstrom dem Kangigdleq-Gletscher in der Umanak-Bucht unmittelbar nördlich benachbart ist. Während sich hier die Profilmessung gerade noch auf ein Vergleichsmodell beschränken konnte, waren zur Höhenreduktion zwei Modelle notwendig. Die Höhenkorrektur wurde zur Kontrolle aus beiden Bildflügen vom 12. und 17. Juli 1957 bestimmt, Tabelle II enthält jedoch nur die ausführlichen Daten der ersten Bestimmung, während die Endergebnisse der zweiten zum Vergleich in einer Zusatzspalte aufgeführt sind. Die gute Übereinstimmung ist ein Maß für die innere Genauigkeit der Methode.

Tabelle I. Geschwindigkeitsbestimmung am Kangigdleq-Gletscher

Profil I: linkes Bild: 12. VII. 57, Nr. 65 — Modell: 12. VII. 57, Nr. 65 und 67
rechtes Bild: 17. VII. 57, Nr. 15

	Profilmessung. $P_0 = 15.00$					Höhenkorrektur				
Pkt.	P mm·10⁻²	s mm	dP mm·10⁻²	$\vec{P}$ mm·10⁻²	G m/Tag	p mm	$\Delta\bar{p}$ mm	$\bar{p}$ mm	$d\bar{p}$ mm·10⁻²	Konstanten
A	0	0	0	0	0	16,65	0	16,65	0	
1	+ 6	6	— 9	+ 15	0,5	16,59	0,06	16,53	— 12	$b_M = 44{,}25$ mm
2	+ 105	14	0	+ 105	3,5	16,80	0,15	16,65	0	
3	+ 230	25	— 8	+ 238	7,9	16,82	0,27	16,55	— 10	$b_P = 33{,}50$ mm
4	+ 219	37	+ 14	+ 205	6,8	17,23	0,40	16,83	+ 18	
5	+ 234	51	+ 31	+ 203	6,8	17,61	0,55	17,06	+ 41	$b_P : b_M = 0{,}756$
6	+ 200	73	+ 17	+ 183	6,1	17,65	0,78	16,87	+ 22	
7	+ 189	87	+ 4	+ 185	6,1	17,63	0,93	16,70	+ 5	Bildmaßstab:
8	+ 148	105	— 10	+ 158	5,3	17,64	1,12	16,52	— 13	1 : 16 667
9	+ 92	125	+ 3	+ 89	3,0	18,03	1,34	16,69	+ 4	Tagesmaß-
10	+ 67	129	— 1	+ 68	2,3	18,02	1,38	16,64	— 1	stabszahl:
11	+ 47	134	— 2	+ 49	1,6	18,05	1,43	16,62	— 3	$\frac{M}{d} = 3333$
12	+ 32	138	— 1	+ 33	1,1	18,12	1,48	16,64	— 1	
E	0	141	0	0	0	18,16	1,51	16,65	0	
					$\Delta p_A^E = + 1{,}51$					

Tabelle II. Geschwindigkeitsbestimmung am Sigssortartoq-Gletscher

Profil: linkes Bild: 12. VII. 57, Nr. 75 Modelle: 12. VII. 57, Nr. 72 + 75 + 78
rechtes Bild: 17. VII. 57, Nr. 35 17. VII. 57, Nr. 32 + 35 + 38

Pkt.	Profilmessung		Korrektur vom 12. VII. 57			Korrektur vom 17. VII. 57			Mittel	Konstanten
	P mm·10⁻²	s mm	dP mm·10⁻²	$\vec{P}$ mm·10⁻²	G m/Tag	dP mm·10⁻²	$\vec{P}$ mm·10⁻²	G m/Tag	G m/Tag	
A	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
1	— 86	3,5	— 85	— 1	0	— 88	+ 2	0,1	0	$b_M = 84{,}20$ mm
2	+ 104	11	— 78	+ 182	6,1	— 68	172	5,7	5,9	
3	+ 181	26	— 63	244	8,1	— 67	248	8,3	8,2	$b_P = 117{,}40$ mm
4	+ 313	50	+ 42	271	9,0	+ 28	285	9,5	9,2	
5	+ 392	73	+ 98	294	9,8	+ 90	302	10,1	10,0	$b_P : b_M = 1{,}394$
6	+ 440	78,5	+ 111	329	11,0	+ 96	354	11,8	11,4	
7	+ 415	101	+ 105	310	10,3	+ 86	329	11,0	10,6	Bildmaßstab:
8	+ 452	120,5	+ 146	306	10,2	+ 138	314	10,5	10,4	1 : 16 667
9	+ 445	141,5	+ 178	267	8,9	+ 154	291	9,7	9,3	
10	+ 342	159	+ 120	222	7,4	+ 119	223	7,4	7,4	
11	+ 340	167	+ 155	185	6,2	+ 131	209	7,0	6,6	Tagesmaßstabszahl:
12	+ 279	180,5	+ 53	226	7,5	+ 51	228	7,6	7,6	
13	+ 31	191	+ 31	0	0	+ 23	8	0,3	0,2	$\frac{M}{d} = 3333$
E	0	197	0	0	0	0	0	0	0	

Höhenkorrektur aus Bildflug vom 12. VII. 57

Pkt.	p mm	s mm					Δp mm·10⁻²	$\Delta \bar{p}$ mm·10⁻²	$d\bar{p}$ mm·10⁻²
A	12,70	0					0	0	0
1	12,08	3,5	$b_M^1 = 84{,}20$ mm				— 62	— 2	— 60
2	12,07	11					— 63	7	— 56
3	12,07	26	$b_M^2 = 80{,}30$ mm				— 63	18	— 45
4	12,66	50					— 4	34	+ 30
I	12,77	61					+ 7	41	+ 48
5	12,88	73	$b_M^1 : b_M^2 = 1{,}048$				+ 18	50	+ 68
6	12,95	78,5					+ 25	53	+ 78
7	12,73	101					+ 3	69	+ 72
II	13,10	117					+ 40	80	+ 120
	p'''	$s—s_1$	$\Delta p'''$	$\Delta p''$	$\Delta p'$	$\Delta \bar{p}'$	Δp	$\Delta \bar{p}$	$d\bar{p}$
I	17,16	0	0	0	+ 7	0	+ 7	41	+ 48
5	17,35	12	+ 19	+ 20	+ 27	— 6	+ 21	50	+ 68
6	17,47	17,5	+ 31	+ 32	+ 39	9	+ 30	53	+ 78
7	17,37	40	+ 21	+ 22	+ 29	20	+ 9	69	+ 72
II	17,74	56	+ 58	+ 61	+ 68	28	+ 40	80	+ 120
8	17,60	59,5	+ 44	+ 46	+ 53	30	+ 23	82	+ 105
9	17,78	80,5	+ 62	+ 65	+ 72	40	+ 32	96	+ 128
10	17,35	98	+ 19	+ 20	+ 27	49	— 22	108	+ 86
11	17,57	106	+ 41	+ 43	+ 50	53	— 3	114	+ 111
12	16,85	119,5	— 31	— 32	— 25	60	— 85	123	+ 38
13	16,68	130	— 48	— 50	— 43	65	— 108	130	+ 22
E	16,46	136	— 70	— 73	— 66	68	— 134	134	0
			$\Delta p_{II} — \Delta p'_{II} = — 28$				$\Delta p_E = — 134$		



Abb. 5. Zunge des Kangigdleq-Gletschers, Umanak-Bucht, Westgrönland. Senkrechtaufnahme aus 5000 m Flughöhe vom 12. Juli 1957 mit zwei über ihren Profilen eingezeichneten Geschwindigkeits-Diagrammen. — Im Profil I, etwa 300 m hinter der Gletscherfront, beträgt die Maximalgeschwindigkeit 7,9 m pro Tag, im Profil II bei etwa 1,6 km Frontabstand 5,0 m pro Tag. — Die Zahlenwerte für Profil I sind in Tabelle I aufgeführt.

Die Geschwindigkeiten sind — wie für die grönländischen Gletscher üblich — in Metern pro Tag angegeben. Aus diesen einmal aus einem Intervall von 5 Tagen bestimmten Werten sind freilich noch keine allgemeinen Schlüsse oder Extrapolationen möglich. Z. B. ist von dänischer sachkundiger Seite (Oberst J. V. Helk, Dr. B. Fristrup) mit Recht darauf hingewiesen worden, daß die Ergebnisse die gewiß vorhandene Einwirkung der Gezeiten auf die Gletscherbewegung nicht berücksichtigen. Mangels entsprechender Daten war dies nicht oder noch nicht möglich.

Doch ergeben sich Geschwindigkeitsdiagramme von plausibler Gestalt und Dimension, aus denen bereits eine Reihe bedeutsamer glaziologischer Schlüsse gezogen werden kann. Dies würde jedoch über den Rahmen dieser photogrammetrischen Arbeit hinausgehen.

Die Ergebnisse erster Versuche zur Bestimmung von Gletschergeschwindigkeiten aus Luftbildern sind ermutigend. Dies liegt vor allem daran, daß die neuen luftphotogrammetrischen Methoden an so intensiv bewegten Gletschern wie denen an Grönlands Westküste

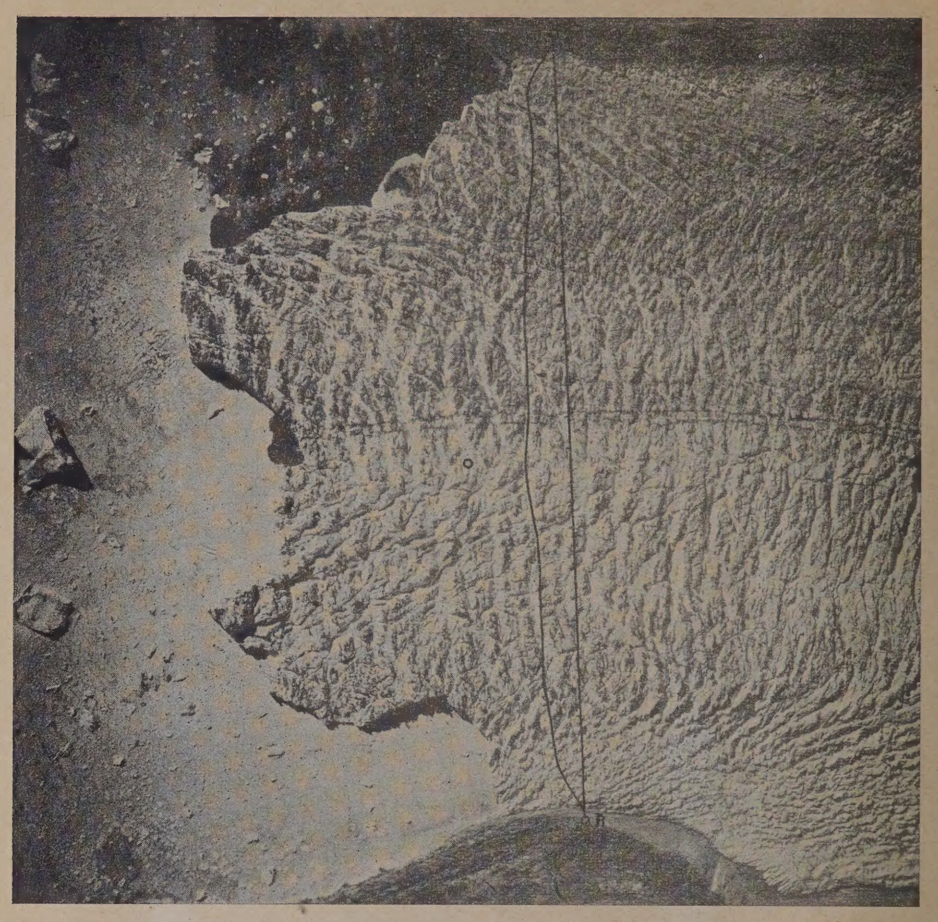


Abb. 6. Zunge des Sigssortartoq-Gletschers, Umanak-Bucht, Westgrönland. Senkrechtaufnahme aus 5000 m Flughöhe vom 12. Juli 1957 mit eingezeichnetem Geschwindigkeits-Profil und -Diagramm. Maximalgeschwindigkeit: 11,4 m pro Tag. Die Zahlenwerte für das Profil sind in Tabelle II aufgeführt.
(Beide Aufnahmen: Secrétariat d'Etat à l'Air, Service d'Action Psychologique et d'Information.)

erprobt werden konnten. Es ist zu hoffen, daß im Rahmen der Internationalen Glaziologischen Grönland-Expedition neue Bildflüge unter besseren Aufnahmebedingungen durchgeführt werden, deren Auswertung nach den beschriebenen oder anderen Methoden der Luftbildmessung ein neues Arbeitsfeld eröffnet.

Zusammenfassung:

Photogrammetrische Verfahren haben in der Gletscherforschung entscheidende Bedeutung gewonnen. Neben Gesamtaufnahmen der Gletscher zum Studium ihres Verhaltens unter Klimaänderungen werden nach einer von R. Finsterwalder entwickelten Methode photogrammetrische Geschwindigkeitsmessungen der Fließbewegung ausgeführt. Diese Arbeiten verwendete bisher fast ausschließlich die terrestrische Photogrammetrie.

Wie eine Abschätzung zeigt, kann jedoch auch die Luftphotogrammetrie bei so langsam bewegten Eisströmen wie den Alpengletschern zur Bestimmung von Fließgeschwindigkeiten

herangezogen werden. Als Auswerteverfahren wird zunächst der Vergleich zweier unabhängiger Bildflüge in angemessenem zeitlichem Intervall diskutiert, dem jedoch eine Reihe von Mängeln anhaftet. An seiner Stelle wird ein Verfahren vorgeschlagen, das die Bildverschiebungen unmittelbar aus zwei Vergleichsbildern der beiden Flüge unter stereoskopischer Betrachtung mißt. Die erforderlichen Reduktionen der Meßwerte auf reine Bewegungsparallaxen ergeben sich aus einem Stereomodell einunddesselben Bildfluges. Das Verfahren kann bei größeren Gletschern auch auf mehrere Vergleichsmodelle ausgedehnt werden.

Als Auswerteinstrumente sind dieser Methode am besten einfache Stereometer-Geräte wie das Stereopret oder Stereotop von Zeiss-Aerotopograph angemessen.

Das Verfahren wurde bei der Auswertung von Luftbildern grönländischer Gletscher erprobt, die im Rahmen von Erkundungen zur Internationalen Glaziologischen Grönland-Expedition (EGIG) im Juli 1957 aufgenommen wurden. Es führte trotz mangelhaften Bildmaterials zu befriedigenden Ergebnissen. Als Beispiele werden die Auswertungen für den Kangigdleq- und den Sigssortartoq-Gletscher, zwei Eisströme der Umanak-Bucht in Westgrönland, mitgeteilt.

Summary:

Speed measurements of the glacial flow with aerial photogrammetry.

Photogrammetric methods have become an essential part of glaciological research work. They consist in topographic surveys of glaciers which permit the study of their behaviour under changing climate, and in photogrammetric speed measurements of the glacial flow according to a method developed by R. Finsterwalder. Until now, these methods were generally based on terrestrial photogrammetry.

An estimation shows that also aerial photogrammetry can be used for speed measurements of glaciers flowing as slow as the glaciers of the Alps. The plotting of two independent flights of a carefully selected temporal interval involves several disadvantages. Therefore, a method is proposed which directly measures dilatations in two pictures of both flights under stereoscopic observation. With the aid of a stereo model of the same flight the measured values are reduced to pure motion parallaxes. The method can be extended to more pictures and models for glaciers of greater size.

The most suitable instruments for this method are simple stereometers or the Zeiss Aerotopograph Stereopret and Stereotope outfits.

The new method was tested by plotting pictures of glaciers in Greenland, taken during reconnaissance flights for the International Glaciological Greenland-Expedition (EGIG) in July 1957. The results are satisfactory, in spite of the very poor photographic material. The plots of two ice streams of the Umanak-Fjord in Western Greenland, the Kangigdleq and Sigssortartoq Glaciers, are quoted as examples.

Résumé

Les procédés photogrammétriques sont devenus de plus haute importance pour la glaciologie.

A côté de prises de vue d'ensemble des glaciers destinées aux études de leur comportement pendant les changements climatiques, on fait des mesurages de leur vitesse d'avancement d'après la méthode photogrammétrique développée par R. Finsterwalder. Pour ces mesurages on a employé jusqu'à ce jour exclusivement la photogrammétrie terrestre.

Une estimation prouve pourtant qu'il est absolument possible d'employer l'aérophotogrammétrie pour déterminer la vitesse d'avancement tellement ralentie qu'est celle des glaciers des Alpes.

Comme procédé de restitution est d'abord discutée la comparaison de deux vols photographiques effectués dans un intervalle convenable. Ce procédé a pourtant un certain nombre de désavantages.

A sa place est proposé un procédé qui sert à mesurer par mesurage stéréoscopique les



déplacements d'image directement d'après deux images d'étalonnage prises pendant les deux survols.

Les réductions des valeurs mesurées sur des parallaxes de mouvement pures sont déterminées d'après un modèle stéréoscopique du même vol photographique. Cette méthode peut être étendue également sur plusieurs modèles d'étalonnage pour la détermination de la vitesse d'avancement de grands glaciers. Comme instruments de restitution se prêtent le mieux les appareils stéréométriques simples comme, par exemple, le stéréoprete ou le stéréotope de Zeiss-Aérotopograph.

Cette méthode a été essayée pour la restitution de prises de vue aériennes de glaciers groënlandais prises au cours des explorations pour l'Expédition glaciologique internationale au Groënland (EGIG), en 1957. Malgré les photographies défectueuses des résultats satisfaisants ont été obtenus.

Comme exemple servent les restitutions de prises de vue aériennes des glaciers Kangigdleq et Sigssorta[...] [...]idental.